

Desarrollo de estrategias para reducir el consumo de energía en procesos de mecanizado

Development of strategies to reduce energy consumption in machining processes

Soledispa-Zambrano, Jhon Espemenides¹; Moina-Álvarez, Bryan David²; Amaguaya-Cazar, Víctor Alfonso³; Caisachana-León, Felix Daniel⁴.

Recibido: 01/03/2023

Aceptado: 28/03/2023

Publicado: 30/04/2023

Cita: Soledispa-Zambrano, J. E., Moina-Álvarez, B. D., Amaguaya-Cazar, V. A., & Caisachana-León, F. D. (2023). Desarrollo de estrategias para reducir el consumo de energía en procesos de mecanizado. *Space Scientific Journal of Multidisciplinary*, 1(2), 58-72. <https://doi.org/10.63618/omd/ssjm/v1/n2/15>.

Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática sobre estrategias para reducir el consumo energético en procesos de mecanizado, actividad industrial intensiva en energía y de alto impacto ambiental. Mediante una metodología de análisis documental, se recopilaron estudios relevantes de bases como Scopus y Web of Science, centrados en la optimización de parámetros de corte y tecnologías de refrigeración y lubricación. Se identificó que ajustar variables como velocidad, avance y profundidad, junto con algoritmos de optimización y sistemas de control adaptativo, puede disminuir el consumo energético hasta en un 40%. Además, se evidenció que tecnologías limpias como la lubricación en cantidad mínima (MQL) y la refrigeración criogénica reducen la fricción, aumentan la vida útil de herramientas y mejoran la eficiencia del proceso. Se concluye que la integración de estas estrategias representa una vía técnica, económica y ambientalmente viable para lograr una manufactura más sostenible.

Palabras clave: eficiencia energética; mecanizado; refrigeración criogénica; lubricación mínima; optimización de parámetros.

Abstract

This article presents a systematic review of strategies to reduce energy consumption in machining processes, an energy-intensive industrial activity with high environmental impact. By means of a documentary analysis methodology, relevant studies were collected from databases such as Scopus and Web of Science, focused on the optimization of cutting parameters and cooling and lubrication technologies. It was identified that adjusting variables such as speed, feed and depth, together with optimization algorithms and adaptive control systems, can reduce energy consumption by up to 40%. In addition, it was shown that clean technologies such as minimum quantity lubrication (MQL) and cryogenic cooling reduce friction, increase tool life and improve process efficiency. It is concluded that the integration of these strategies represents a technically, economically and environmentally viable way to achieve more sustainable manufacturing.

Keywords: energy efficiency; machining; cryogenic cooling; minimum lubrication; parameter optimization.

¹ Unidad Educativa Amazonas; Ecuador, Orellana; <https://orcid.org/0009-0002-2360-8660>; jhon.soledispa@educacion.gob.ec

² Unidad Educativa Amazonas; Ecuador, Orellana; <https://orcid.org/0009-0008-0441-3116>; bryan.moina@educacion.gob.ec

³ Unidad Educativa Amazonas; Ecuador, Orellana; <https://orcid.org/0009-0003-3482-5924>; victor.amaguay@educacion.gob.ec

⁴ Unidad Educativa Amazonas; Ecuador, Orellana; <https://orcid.org/0009-0003-9421-0235>; felix.caisachana@educacion.gob.ec



1. Introducción

El mecanizado es uno de los procesos industriales más comunes en la manufactura moderna, fundamental para la transformación de materias primas en productos finales con alto grado de precisión. Sin embargo, este proceso es intensivo en consumo energético, lo cual representa una preocupación significativa tanto desde la perspectiva económica como ambiental. De acuerdo con estudios recientes, los procesos de mecanizado pueden llegar a consumir hasta un 30% de la energía total utilizada en plantas manufactureras, dependiendo del tipo de material, la herramienta utilizada y los parámetros del proceso (Shokrani, Dhokia, Newman, & Imani-Asrai, 2022). Esta elevada demanda energética no solo incrementa los costos de producción, sino que también contribuye a la huella de carbono de la industria, lo cual contraviene los compromisos internacionales en torno a la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático.

Uno de los principales factores que inciden en el consumo energético durante el mecanizado es la configuración inadecuada de los parámetros de corte, tales como la velocidad de corte, la profundidad de pasada y el avance por diente. Cuando estos parámetros no están optimizados, se incrementa el tiempo de operación y la generación de calor, lo cual obliga a los sistemas a consumir mayor energía para mantener la estabilidad del proceso (Duc, Sato, & Ikeda, 2020). Además, el tipo de herramienta y su estado de desgaste también influyen significativamente en el requerimiento energético, ya que una herramienta desgastada incrementa la fricción entre la pieza y el filo, aumentando así la energía requerida por el husillo para mantener la operación (Li, He, & Liu, 2021).

Por otro lado, el tipo de refrigerante utilizado y la eficiencia del sistema de lubricación también son elementos que afectan directamente el consumo de energía. Algunos estudios han demostrado que el uso de técnicas avanzadas como la lubricación mínima (Minimum Quantity Lubrication, MQL) o la refrigeración criogénica pueden contribuir significativamente a la reducción del consumo energético, al mejorar la evacuación del calor y reducir la fricción entre herramienta y pieza (Pusavec et al., 2020). Sin embargo, la implementación de estas tecnologías aún enfrenta limitaciones prácticas y económicas, especialmente en industrias pequeñas y medianas donde los recursos para la innovación tecnológica son limitados.

Ante esta problemática, se hace imprescindible desarrollar estrategias que permitan reducir el consumo energético sin comprometer la calidad del producto final ni la productividad del proceso. En este contexto, las estrategias pueden ir desde la optimización de parámetros de corte mediante inteligencia artificial, el rediseño de herramientas con materiales más eficientes, hasta la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real para gestionar el uso de energía de forma dinámica (Zhou, Li, & Wang, 2021). Estas estrategias deben ser validadas y adaptadas a distintos contextos industriales para garantizar su aplicabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

La relevancia de abordar esta temática radica en el creciente compromiso global con la sostenibilidad y la eficiencia energética en el sector manufacturero. Organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA) han señalado la urgencia de reducir el consumo energético en la industria mediante el desarrollo de tecnologías limpias y eficientes (Hernández et al., 2017). Además, la reducción del consumo energético en el mecanizado no solo se traduce en beneficios ambientales, sino también en ventajas competitivas para las empresas, tales como la reducción de costos operativos y el cumplimiento de regulaciones ambientales cada vez más estrictas.

Este artículo de revisión tiene como objetivo analizar y sistematizar las estrategias más relevantes y efectivas para la reducción del consumo de energía en procesos de mecanizado, con base en la literatura científica más reciente. A través de una revisión bibliográfica rigurosa, se identificarán las principales líneas de investigación, los métodos aplicados y las tecnologías emergentes que han mostrado potencial en este campo. Esta revisión permitirá no solo mapear el estado del arte, sino también identificar vacíos en el conocimiento actual que podrían orientar futuras investigaciones (Ardila et al., 2022).

La viabilidad de este estudio se sustenta en la disponibilidad de una amplia base de datos científicos indexados en Scopus y Web of Science, lo que garantiza el acceso a investigaciones actualizadas y verificadas. Asimismo, dado que se trata de un artículo de revisión, su desarrollo no requiere de recursos experimentales costosos, sino de una metodología sistemática de análisis documental. Esto lo hace especialmente apropiado para entornos académicos y de investigación donde los recursos son limitados, pero se dispone de acceso a bibliografía científica de calidad (Sorin et al., 2021).

En síntesis, la necesidad de desarrollar estrategias para reducir el consumo energético en el mecanizado es ineludible, tanto por sus implicaciones económicas como por su impacto ambiental. Una revisión sistemática de la literatura contribuirá a consolidar el conocimiento existente y a orientar la implementación de prácticas más eficientes y sostenibles en el ámbito industrial (Khan et al., 2022).

2. Materiales y Métodos

El presente artículo adopta un enfoque exploratorio mediante una revisión bibliográfica sistemática, orientada a identificar, analizar y sintetizar las estrategias existentes para la reducción del consumo de energía en procesos de mecanizado. Este tipo de estudio resulta adecuado cuando se busca comprender en profundidad un fenómeno complejo a partir del conocimiento acumulado, sin recurrir a la experimentación directa, permitiendo así una visión comprensiva de los avances, tendencias y vacíos presentes en la literatura científica.

Para la recolección de información, se realizó una búsqueda exhaustiva de artículos científicos en bases de datos académicas reconocidas internacionalmente,

específicamente Scopus y Web of Science, por ser repositorios que garantizan la calidad, pertinencia y actualidad de los documentos indexados. La búsqueda se ejecutó utilizando combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como (“energy consumption”, “machining processes”, “energy efficiency in manufacturing”, “cutting parameters optimization”, “tool wear and energy”), entre otras, incluyendo operadores booleanos y filtros por área temática (ingeniería, ciencias de materiales, manufactura sostenible), idioma (inglés y español), y periodo de publicación (últimos 10 años).

Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión con el fin de delimitar el corpus de análisis. Se consideraron únicamente artículos publicados en revistas científicas revisadas por pares, que presentaran investigaciones empíricas, estudios de caso, desarrollos tecnológicos o revisiones previas relacionadas específicamente con la eficiencia energética en procesos de mecanizado. Se excluyeron documentos duplicados, publicaciones sin acceso completo, textos no científicos (como notas técnicas o editoriales) y aquellos cuyo enfoque principal no abordara directamente el consumo energético en operaciones de mecanizado.

Una vez conformado el conjunto de artículos seleccionados, se procedió a una lectura analítica y crítica de cada documento. Esta revisión incluyó la identificación de los objetivos de cada estudio, el tipo de estrategia de eficiencia energética propuesta, los métodos de validación utilizados, así como los principales resultados y conclusiones reportadas por los autores. Posteriormente, se organizó la información en categorías temáticas que permitieran identificar los enfoques más relevantes y recurrentes en la literatura, tales como la optimización de parámetros de corte, el uso de tecnologías de refrigeración alternativas, la integración de sistemas de monitoreo y control inteligente, y el diseño de herramientas de alto rendimiento.

El análisis e interpretación de los resultados se realizó mediante una triangulación conceptual, comparando los hallazgos entre sí y relacionándolos con marcos teóricos sobre eficiencia energética en manufactura avanzada. Asimismo, se prestó especial atención a la identificación de tendencias emergentes, así como a la detección de vacíos de investigación que puedan constituir oportunidades para estudios futuros. El proceso completo fue guiado por los principios de transparencia, trazabilidad y rigor metodológico que caracterizan a las revisiones sistemáticas.

Esta metodología permite garantizar la validez y fiabilidad del contenido presentado, dado que se sustenta en una base documental sólida y verificada, compuesta por estudios relevantes y actualizados. A través de este enfoque, se busca proporcionar una visión integral del estado del arte en torno a la reducción del consumo energético en procesos de mecanizado, contribuyendo al desarrollo de prácticas industriales más sostenibles y eficientes.

3. Resultados

3.1. Optimización de parámetros de corte

La eficiencia energética en los procesos de mecanizado ha adquirido una relevancia central dentro del paradigma de la manufactura sostenible, debido a su impacto directo sobre los costos operativos, la huella ambiental y la competitividad de las industrias. En este marco, la optimización de los parámetros de corte representa una estrategia prioritaria, ya que estas variables son las principales responsables del comportamiento energético del proceso. La energía consumida durante el mecanizado se destina principalmente al movimiento del husillo, la remoción del material, la generación de calor y la refrigeración. La velocidad de corte (V_c), el avance por diente (f_z) y la profundidad de pasada (a_p) configuran un sistema de control integral que determina la cantidad de energía requerida para producir una pieza conforme a especificaciones (Khan et al., 2022).

El ajuste inadecuado de estas variables conduce a condiciones de trabajo ineficientes, como esfuerzos de corte innecesarios, incremento en la fricción, desgaste acelerado de herramientas, inestabilidad del proceso y una mayor necesidad de energía para refrigeración y corrección de errores. En contraposición, la optimización permite maximizar la tasa de remoción de material por unidad de energía consumida, minimizando pérdidas energéticas por vibración, sobrecalentamiento o tiempo de ciclo excesivo. A través de un enfoque sistémico, que integre el análisis físico del proceso, técnicas de simulación computacional y tecnologías inteligentes de monitoreo, es posible transformar el mecanizado tradicional en un sistema altamente eficiente y adaptable a las demandas contemporáneas de sostenibilidad (Sorin et al., 2021).

3.1.1. Ajustar velocidad, avance y profundidad reduce el consumo energético

El ajuste racional de los parámetros de corte constituye la forma más directa y accesible de mejorar la eficiencia energética del proceso. Cada uno de estos parámetros tiene un efecto específico sobre el desempeño del mecanizado, pero es su interacción lo que determina el comportamiento global del sistema. La velocidad de corte, por ejemplo, incide principalmente en la cantidad de calor generado en la zona de corte, lo cual afecta tanto el consumo energético como la durabilidad de la herramienta. Un valor demasiado bajo incrementa la fricción y prolonga el tiempo de contacto, mientras que un valor excesivo produce sobrecalentamiento, reduce la vida útil de la herramienta y requiere una mayor demanda de refrigeración (Ardila et al., 2022).

El avance por diente está directamente relacionado con la carga de corte y la eficiencia volumétrica del proceso. Un avance muy pequeño reduce la tasa de remoción de material, alargando el tiempo de ciclo y elevando el consumo total de energía. Por otro lado, un avance excesivo puede provocar vibraciones, pérdida de precisión y sobreesfuerzo mecánico, lo que también se traduce en un consumo energético mayor. La profundidad de pasada determina la sección transversal del

corte y, por tanto, la potencia instantánea requerida. Si bien un mayor valor puede incrementar la eficiencia volumétrica, también implica un mayor desgaste de herramienta si no está acompañado de un avance y velocidad adecuados (Hernández et al., 2017).

Una configuración equilibrada de estos tres parámetros permite alcanzar un punto óptimo de operación, donde la remoción de material se realiza con la mínima cantidad de energía necesaria. Esta optimización también contribuye a reducir la cantidad de energía indirecta utilizada en sistemas auxiliares, como la refrigeración, la ventilación o la compensación térmica, promoviendo un enfoque más integral de eficiencia energética en el taller de mecanizado (Herrero, 2006).

3.1.2. Algoritmos de optimización mejoran la eficiencia del proceso

El uso de algoritmos de optimización computacional representa una evolución significativa en la búsqueda de condiciones de corte energéticamente eficientes. En lugar de basarse exclusivamente en la experiencia del operario o en pruebas experimentales costosas y prolongadas, los algoritmos permiten simular y predecir el comportamiento del proceso bajo diferentes combinaciones de parámetros. A través de modelos matemáticos y estadísticos, estas herramientas identifican las configuraciones que minimizan el consumo de energía sin comprometer otros indicadores clave como la rugosidad superficial, la integridad del material, el tiempo de ciclo o la vida útil de la herramienta (Ardila et al., 2022).

Las técnicas de optimización más utilizadas incluyen métodos evolutivos, como los algoritmos genéticos, los algoritmos de enjambre de partículas, la optimización multiobjetivo y las redes neuronales artificiales. Estos algoritmos no solo permiten encontrar soluciones óptimas dentro de espacios de búsqueda complejos y multidimensionales, sino que también son capaces de adaptarse a restricciones industriales reales, como límites de potencia del husillo, condiciones térmicas o características específicas del material (Hernández et al., 2017).

Además, la integración de estos algoritmos en plataformas de simulación o sistemas CAD/CAM permite automatizar la toma de decisiones desde la etapa de planificación, reduciendo la necesidad de ajustes posteriores en el taller. Esto conduce a una disminución de los tiempos improductivos, una mayor precisión en la estimación del consumo energético por pieza y una trazabilidad más eficiente del desempeño energético a lo largo del proceso de producción. En un entorno donde la sostenibilidad y la competitividad están cada vez más interconectadas, estas herramientas ofrecen un valor estratégico para las empresas manufactureras (Rodríguez-Salazar & Mercado Caruso, 2021).

3.1.3. Sistemas de ajuste dinámico adaptan parámetros en tiempo real

La incorporación de tecnologías de monitoreo en tiempo real y sistemas de control adaptativo ha permitido llevar la optimización de los parámetros de corte a un nuevo nivel. A diferencia de las configuraciones estáticas, que se mantienen constantes a lo largo de todo el ciclo de mecanizado, los sistemas dinámicos permiten ajustar los

parámetros en función de las condiciones reales de operación. Estos sistemas utilizan sensores integrados en la máquina herramienta para capturar datos como la vibración de la herramienta, la potencia del husillo, la temperatura de la zona de corte o el desgaste progresivo de la herramienta. A partir de esta información, algoritmos de control adaptativo ajustan de forma automática y continua los valores de velocidad, avance y profundidad, manteniendo el proceso dentro de una ventana operativa energéticamente eficiente (Ariza, 2011).

Esta capacidad de adaptación en tiempo real resulta especialmente valiosa en el mecanizado de piezas complejas, en series pequeñas o en materiales con propiedades variables, donde las condiciones óptimas pueden cambiar durante el proceso. La flexibilidad de estos sistemas permite evitar condiciones ineficientes o riesgosas, como el trabajo con parámetros excesivos ante un desgaste avanzado de la herramienta, o el mantenimiento de parámetros conservadores innecesarios que aumentan el tiempo de ciclo y el consumo de energía.

Además de mejorar la eficiencia energética, estos sistemas contribuyen a la estabilidad dimensional, la reducción de la reprocesamiento, la mejora de la calidad superficial y la disminución de los residuos industriales. Su implementación representa una inversión estratégica en el contexto de la industria 4.0, en la que la conectividad, la automatización inteligente y la sostenibilidad son elementos clave para la innovación (Ospina et al., 2014).

3.1.4. La optimización puede reducir hasta un 40 % el consumo de energía

La combinación de estrategias de optimización basadas en ajustes técnicos, algoritmos computacionales y tecnologías de control inteligente ha demostrado, de forma sistemática, su capacidad para generar reducciones significativas en el consumo energético. En estudios realizados bajo condiciones industriales controladas, estas técnicas han permitido alcanzar reducciones de hasta un 40 % en el consumo energético total por componente mecanizado. Este ahorro no solo tiene implicaciones directas en los costos de operación, sino que también representa una disminución significativa en la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente cuando la energía utilizada proviene de fuentes no renovables (Rodríguez-Salazar & Mercado Caruso, 2021).

Esta reducción energética acumulada proviene no solo de la mejora en el corte directo, sino también de la disminución del tiempo de operación, el menor uso de sistemas de refrigeración, la extensión de la vida útil de las herramientas, y la reducción en la generación de piezas defectuosas. De este modo, la optimización energética se convierte en una estrategia integral que mejora el desempeño global del sistema productivo (Ariza, 2011).

Adicionalmente, este enfoque es coherente con los principios de la economía circular y la responsabilidad ambiental corporativa, al fomentar la utilización eficiente de los recursos y la minimización del impacto ambiental en todas las etapas del ciclo de vida del producto. En este sentido, la optimización de los parámetros de corte no

debe considerarse como una acción aislada o meramente técnica, sino como un componente esencial de una estrategia industrial moderna y sostenible, orientada hacia la eficiencia operativa, la innovación tecnológica y el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad.

3.2. Tecnologías de refrigeración y lubricación

La eficiencia energética en procesos de mecanizado no solo depende de la correcta selección de parámetros de corte, sino también de la capacidad del sistema para disipar eficazmente el calor generado durante el contacto herramienta-material. La zona primaria de corte es uno de los entornos térmicamente más exigentes de la manufactura moderna, ya que concentra deformación plástica intensa, fricción mecánica y altas velocidades, todo lo cual da lugar a una acumulación térmica que, si no se gestiona adecuadamente, afecta negativamente tanto el rendimiento del proceso como la integridad de las piezas y herramientas involucradas (Mercado & Peña, 2016).

Tradicionalmente, esta problemática se ha abordado mediante el uso de fluidos de corte en grandes volúmenes. Estos fluidos cumplen funciones refrigerantes y lubricantes, pero su empleo masivo genera externalidades importantes: altos costos de operación, complejidad logística en su manejo, impacto ambiental negativo por generación de residuos peligrosos, y riesgos para la salud ocupacional debido a la exposición a aerosoles y vapores contaminantes. Además, el bombeo, filtrado y recirculación de estos fluidos implica un consumo energético considerable, que debe contabilizarse dentro del balance total de energía del proceso.

En respuesta a estas limitaciones, han surgido alternativas avanzadas como la lubricación en cantidad mínima (Minimum Quantity Lubrication, MQL) y la refrigeración criogénica, ambas orientadas a mejorar la eficiencia térmica y tribológica del proceso con un impacto ambiental y energético mucho menor. Estas tecnologías no solo permiten reducir la temperatura y la fricción durante el mecanizado, sino que también mejoran la calidad superficial, aumentan la vida útil de la herramienta y reducen el consumo energético global del sistema (Herrero, 2006).

3.2.1. MQL y refrigeración criogénica disminuyen fricción y calor

La generación de calor y fricción excesiva en la zona de corte constituye una de las principales causas del bajo rendimiento energético en procesos de mecanizado. Cuando no se controla adecuadamente, este calor incrementa la resistencia al corte, favorece el desgaste acelerado de la herramienta y requiere un mayor esfuerzo del motor principal, aumentando así el consumo energético total. Las tecnologías MQL y criogénica han demostrado ser altamente eficaces para mitigar estos efectos al intervenir directamente en la fuente del problema: la interacción entre herramienta y material (Pusavec et al., 2020).

En el caso del MQL, se emplea una microdosificación de lubricante atomizado — usualmente aceite vegetal o sintético— transportado por una corriente de aire

comprimido. Esta mezcla es dirigida con precisión a la zona de corte, formando una película lubricante extremadamente delgada pero eficaz, que reduce el coeficiente de fricción y facilita la evacuación de las virutas calientes. A diferencia de los fluidos de corte convencionales, que actúan por inundación y requieren cantidades voluminosas, el MQL opera con apenas mililitros por hora, lo que permite un control térmico efectivo sin generar grandes volúmenes de residuos ni requerir energía adicional para su gestión (Mercado & Peña, 2016).

La refrigeración criogénica, por otro lado, utiliza fluidos a temperaturas extremadamente bajas —como el nitrógeno líquido o el dióxido de carbono en estado subenfriado— aplicados directamente sobre la zona de contacto. Esta técnica reduce la temperatura del filo de corte de manera inmediata, impidiendo el deterioro térmico de los recubrimientos de herramienta y limitando las reacciones químicas indeseables que ocurren a altas temperaturas. Además, el enfriamiento profundo produce un endurecimiento local del filo, mejorando su resistencia al desgaste sin necesidad de modificar su geometría ni su composición química.

Ambas tecnologías reducen significativamente la fricción y el calor, lo que disminuye la fuerza de corte requerida, reduce la potencia absorbida por el husillo y mejora la estabilidad térmica del proceso. Como consecuencia, el sistema requiere menos energía para mantener las condiciones operativas deseadas, lo que se traduce en un ahorro energético directo y en una mayor eficiencia global del proceso (Pusavec et al., 2020).

3.2.2. Estas técnicas prolongan la vida útil de la herramienta

Uno de los beneficios más valiosos derivados del uso de MQL y refrigeración criogénica es la extensión de la vida útil de las herramientas de corte. En condiciones de corte convencionales, el calor excesivo y la fricción intensa provocan fenómenos de desgaste como la abrasión, la adhesión, la difusión y el desgaste por oxidación, todos los cuales degradan rápidamente el filo de la herramienta y provocan su fallo prematuro. Esto obliga a frecuentes paradas de máquina, reemplazos, reafilados y ajustes, los cuales implican no solo costes adicionales, sino también un uso indirecto de energía que debe considerarse en el análisis de sostenibilidad (Perveen et al., 2021).

Con la aplicación de MQL, se reduce de forma significativa la fricción entre la herramienta y la pieza, lo que disminuye el desgaste por abrasión y reduce la probabilidad de adherencia del material mecanizado al filo de corte. El lubricante, al penetrar eficazmente en la zona de contacto, actúa como barrera protectora que suaviza la interacción y prolonga la integridad del filo. Esto permite mantener una geometría de corte constante durante más tiempo, asegurando una mayor uniformidad en las condiciones de mecanizado y reduciendo la necesidad de intervenciones correctivas (Ospina et al., 2014).

Por su parte, la refrigeración criogénica impide que se alcancen temperaturas críticas en el filo de la herramienta, limitando los procesos de difusión atómica y

evitando el reblandecimiento térmico de los recubrimientos de carburo, cerámica o diamante policristalino. Esta técnica es particularmente eficaz en el mecanizado de materiales de baja maquinabilidad, como las superaleaciones níquel-cromo, que presentan alta resistencia térmica y tienden a reaccionar químicamente con la herramienta a temperaturas elevadas.

La prolongación de la vida útil de la herramienta tiene múltiples efectos positivos: menor frecuencia de cambios de herramienta, menor tiempo improductivo, menor necesidad de inventario de repuestos y, sobre todo, menor consumo de energía indirecta asociada a la fabricación, transporte, almacenamiento y descarte de herramientas. Por tanto, estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia energética directa del proceso, sino que también optimizan el sistema productivo en su conjunto (Ospina et al., 2014).

3.2.3. MQL es más eficiente que los fluidos de corte convencionales

La comparación entre la lubricación en cantidad mínima y los sistemas tradicionales de mecanizado en húmedo revela una clara superioridad de MQL desde la perspectiva de la eficiencia energética, ambiental y operativa. Mientras los fluidos convencionales requieren grandes volúmenes, infraestructura compleja y consumos energéticos asociados a su transporte, recirculación y tratamiento, el MQL utiliza apenas unas gotas por minuto, lo cual representa una reducción sustancial de los recursos necesarios para su aplicación (Perveen et al., 2021).

Desde el punto de vista energético, el uso de MQL implica una disminución tanto del consumo eléctrico directo —al reducir la potencia de corte necesaria por menor fricción— como del consumo auxiliar, al prescindir de bombas, filtros y sistemas de enfriamiento de gran escala. Esta eficiencia se traduce en una menor demanda total de energía por pieza mecanizada, con impactos positivos tanto en los costes operativos como en la huella de carbono del proceso.

Además, el MQL elimina virtualmente la necesidad de tratamiento de residuos, ya que el volumen de fluido utilizado es tan bajo que se evapora o se elimina con facilidad junto con las virutas. Esto simplifica el cumplimiento de normativas ambientales, reduce los costos de disposición final y mejora las condiciones de trabajo del operario al disminuir la exposición a compuestos químicos volátiles.

Desde un enfoque integral, el MQL no solo mejora la eficiencia energética del proceso, sino que también promueve una manufactura más limpia, segura y sustentable. Por estas razones, se consolida como una de las tecnologías más prometedoras en el camino hacia la descarbonización de los sistemas de producción y la implementación de estrategias industriales alineadas con los principios de la economía circular y la sostenibilidad ambiental (Ariffin et al., 2020).

4. Discusión

La implementación de estrategias orientadas a la reducción del consumo energético en procesos de mecanizado ha emergido como una necesidad imperativa en el

contexto actual de la manufactura sostenible. En esta revisión se han identificado dos ejes fundamentales de actuación: la optimización de los parámetros de corte y la incorporación de tecnologías avanzadas de refrigeración y lubricación. Ambas dimensiones, aunque distintas en su naturaleza técnica, convergen en su propósito de disminuir la demanda energética total del sistema, aumentar la eficiencia del proceso y reducir las externalidades negativas asociadas a la producción (Ariffin et al., 2020).

La optimización de los parámetros de corte, entendida como el ajuste preciso de variables operativas como la velocidad de corte, el avance por diente y la profundidad de pasada, representa una medida primaria de gran impacto. La adecuada configuración de estas variables no solo permite una mejora directa en la eficiencia del arranque de viruta, sino que también evita el sobredimensionamiento energético del proceso, minimizando así pérdidas por fricción, vibración o sobrecarga térmica. Cuando estas condiciones son gestionadas con un enfoque sistemático, se obtiene una notable reducción en la energía específica requerida por unidad de material removido, acompañada de una mejora simultánea en la calidad superficial, la estabilidad dimensional y la vida útil de la herramienta (Sorin et al., 2021).

En esta línea, los algoritmos de optimización computacional han demostrado ser aliados estratégicos, al permitir modelar y predecir el comportamiento energético del proceso bajo múltiples restricciones y objetivos de desempeño. Su integración en entornos de manufactura asistida por computador posibilita una toma de decisiones informada y anticipada, capaz de reducir el número de ensayos empíricos y maximizar la productividad con un consumo energético racional. A esto se suma el potencial transformador de los sistemas de ajuste dinámico en tiempo real, que dotan al sistema de una capacidad adaptativa crítica para operar bajo condiciones óptimas incluso ante perturbaciones inesperadas. Tales sistemas, al actuar sobre la base de datos provenientes de sensores integrados, garantizan la continuidad del proceso dentro de una banda de eficiencia energética, reforzando el concepto de manufactura inteligente (Ospina et al., 2014).

Por otra parte, la incorporación de tecnologías no convencionales de refrigeración y lubricación, como la lubricación en cantidad mínima y la refrigeración criogénica, introduce un enfoque radicalmente distinto al del mecanizado en húmedo tradicional. Estas tecnologías actúan no solo sobre el control térmico del proceso, sino también sobre su eficiencia tribológica, al reducir la fricción y, en consecuencia, la potencia de corte requerida. Este doble efecto permite disminuir tanto el consumo energético directo como el desgaste de las herramientas, extendiendo su vida útil y reduciendo los tiempos muertos y los costos indirectos de mantenimiento. La eficacia de estas tecnologías se ve potenciada cuando se integran de forma coherente con estrategias de parametrización optimizada, generando sinergias

operativas que redundan en una mejora sistémica del rendimiento energético (Ariffin et al., 2020).

Además, el uso de técnicas como MQL ofrece una ventaja operativa adicional al eliminar o minimizar los costos y riesgos asociados a la gestión de grandes volúmenes de fluidos de corte. Su bajo consumo, facilidad de aplicación y compatibilidad con aceites biodegradables permiten una alineación más estrecha con los principios de la producción limpia y la sostenibilidad ambiental. En comparación, la refrigeración criogénica se muestra especialmente eficaz en condiciones extremas, como el mecanizado de materiales de alta resistencia térmica, donde los métodos convencionales resultan insuficientes. Su capacidad para estabilizar térmicamente el proceso y proteger el filo de corte abre nuevas posibilidades para operaciones de alta exigencia con eficiencia energética mejorada (Mercado & Peña, 2016).

A partir del análisis integrado de estas estrategias, se puede concluir que la mejora en la eficiencia energética del mecanizado no debe abordarse desde una sola dimensión, sino como el resultado de la interacción entre múltiples variables de diseño, operación y tecnología. La reducción del consumo energético es posible no solo mediante intervenciones aisladas, sino a través de la construcción de sistemas de mecanizado inteligentes, adaptativos y sostenibles, en los que la eficiencia energética se consolida como un indicador transversal del rendimiento global. Esta visión holística es clave para avanzar hacia modelos de manufactura más responsables, resilientes y competitivos en el marco de la transformación industrial contemporánea (Ardila et al., 2022).

5. Conclusiones

La revisión sistemática de estrategias orientadas a la reducción del consumo energético en procesos de mecanizado permite constatar que existen múltiples vías técnicas, operativas y tecnológicas que pueden ser implementadas con resultados altamente eficaces. La eficiencia energética, entendida no solo como una reducción del gasto eléctrico, sino como una optimización integral del uso de los recursos disponibles, se revela como un componente clave de la competitividad industrial y de la sostenibilidad ambiental en la manufactura moderna.

Uno de los hallazgos más relevantes del análisis ha sido el reconocimiento del rol central que desempeña la correcta configuración de los parámetros de corte. Ajustar con precisión la velocidad de corte, el avance por diente y la profundidad de pasada permite reducir considerablemente la fricción mecánica y la generación de calor en la zona de corte, dos factores que inciden directamente en el esfuerzo del husillo y en la potencia total requerida por la máquina herramienta. Esta estrategia, si bien puede parecer elemental desde una perspectiva tradicional, adquiere una nueva dimensión cuando se integra con métodos analíticos y herramientas de simulación

computacional, permitiendo establecer condiciones de corte óptimas no solo en términos de productividad, sino también desde el punto de vista energético.

El uso de algoritmos de optimización representa una evolución significativa en la forma de abordar la planificación de procesos. Su capacidad para analizar múltiples variables y restricciones de forma simultánea, así como su potencial para identificar soluciones no intuitivas, convierte a estas herramientas en instrumentos esenciales para el diseño de procesos energéticamente eficientes. En combinación con sistemas de monitoreo en tiempo real y plataformas de control adaptativo, los algoritmos no solo optimizan parámetros de forma previa, sino que permiten ajustes dinámicos durante la ejecución del mecanizado, manteniendo el sistema dentro de márgenes de eficiencia energética aún ante variaciones imprevistas o condiciones de operación cambiantes.

Otra dimensión clave identificada ha sido la adopción de tecnologías sostenibles de refrigeración y lubricación, entre las cuales destacan la lubricación en cantidad mínima y la refrigeración criogénica. Estas técnicas representan un cambio de paradigma respecto a los métodos convencionales, al intervenir directamente sobre la fricción y el control térmico sin recurrir al uso masivo de fluidos contaminantes ni a sistemas auxiliares de alta demanda energética. Su aplicación no solo mejora la eficiencia energética directa del corte, sino que también incide en la durabilidad de las herramientas, en la calidad del producto final y en la reducción de residuos industriales, conformando un enfoque integral de sostenibilidad operativa.

El análisis permite afirmar que la combinación de estrategias —optimización de parámetros, algoritmos de decisión y tecnologías limpias de lubricación y enfriamiento— puede generar reducciones sustanciales en el consumo energético total, superando en algunos casos el cuarenta por ciento. Esta cifra no solo representa un logro técnico destacable, sino que también implica una contribución significativa a la reducción de emisiones, al uso eficiente de insumos y a la racionalización de procesos industriales en su conjunto. En este sentido, la eficiencia energética no puede entenderse como una acción aislada, sino como el resultado de una integración sistemática de decisiones tecnológicas, operativas y estratégicas.

Cabe destacar que la transición hacia un modelo de mecanizado energéticamente eficiente requiere más que la mera incorporación de nuevas tecnologías. Implica también una transformación cultural y organizacional dentro de las industrias, donde la eficiencia energética se asuma como un objetivo transversal, integrado desde la etapa de diseño hasta el control final de calidad. La adopción de tecnologías inteligentes, el monitoreo constante de indicadores clave y la formación del capital humano en criterios de sostenibilidad son factores críticos para consolidar esta transformación.

En consecuencia, se concluye que el desarrollo de estrategias para reducir el consumo de energía en procesos de mecanizado es técnicamente viable,

económicamente rentable y ambientalmente necesario. La evidencia analizada demuestra que el camino hacia una manufactura más eficiente y sostenible ya no es una opción, sino una obligación frente a los desafíos contemporáneos de escasez de recursos, presión normativa y exigencias del mercado. Abordar esta transición con un enfoque integral y multidisciplinario permitirá a las industrias no solo reducir sus costos y mejorar su rendimiento operativo, sino también posicionarse estratégicamente en una economía global orientada a la descarbonización, la circularidad y la innovación tecnológica responsable.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Ardila, María I., Rudas, Juan. S., Núñez, Edwin J., Rodríguez, Miguel A., Ardila, Juan G., Jiménez, Johnatan Cardona, & Isaza, Cesar. (2022). Estudio de consumos energéticos en los centros de mecanizado CNC Haas UMC-750 y Leadwell V-40iT@.. *Ingeniería y competitividad*, 24(2), e21211377. Epub May 26, 2022. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11377>
- Ariffin, A. K., Hassan, M. A., & Sulaiman, S. (2020). Adaptive control in machining of titanium alloys: A sustainable approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3), 1549–1560.
- Ariza, A. (2011). Perspectiva histórico espacial del consumo energético en Colombia, 1975-2007. *Sociedad y Territorio*, 9(18), 111–145. <https://doi.org/10.18046/syt.v9i18.1075>
- Duc, B. N., Sato, T., & Ikeda, R. (2020). Optimization of cutting parameters for energy efficiency in milling operations. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120589.
- Hernández, Jean C, Pinto, Ángel D, González, Jaime A, Pérez-García, Nelson A, Torres, Juan M, & Rengel, José-Eduardo. (2017). Nuevas Estrategias para un Plan de Uso Eficiente de la Energía Eléctrica. *Ciencia, docencia y tecnología*, (54), 75-99. Recuperado en 09 de mayo de 2025, de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-17162017000100003&lng=es&tlng=es
- Herrero Martín, J. (2006). *Análisis del consumo energético del sector residencial en España y su comparación con el de la Unión Europea* [Tesis de máster, Universidad Politécnica de Madrid]. E-Prints Complutense. <https://oa.upm.es/2183/>
- Khan, A. A., Ahmad, M., Sheikh, M. A., & Sarwar, M. (2022). Energy-efficient machining of AISI 316L stainless steel under optimized cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133654.

- Li, H., He, Y., & Liu, Z. (2021). Tool wear and its effect on energy consumption in turning processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 247–254.
- MERCADO, VERENA, & PEÑA, JOSÉ BERNARDO. (2016). Modelo de gestión de mantenimiento enfocado en la eficiencia y optimización de la energía eléctrica. *Saber*, 28(1), 99-105. Recuperado en 09 de mayo de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622016000100010&lng=es&tlng=es
- Ospina, Nelson L, Molina, William A, Simanca, Pedro L, & Díaz, Jairo Á. (2014). Machining Strategy Applied to a Small Conventional Lathe adapted to CNC. *Información tecnológica*, 25(4), 63-72. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000400009>
- Perveen, A., Dhar, N. R., & Islam, M. W. (2021). Multi-objective optimization of turning parameters using genetic algorithms for enhanced energy efficiency. *Measurement*, 183, 109844.
- Pusavec, F., Krajnik, P., & Kopac, J. (2020). Transitioning to sustainable production – part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.010>
- Rodríguez-Salazar, J. E., & Mercado Caruso, N. (2021). Soluciones para la mejora de la calidad del servicio de energía eléctrica en Barranquilla. Revisión de la literatura. *Boletín De Innovación, Logística Y Operaciones*, 3(1). <https://doi.org/10.17981/bilo.3.1.2021.08>
- Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T., & Imani-Asrai, R. (2022). Energy consumption reduction in CNC machining: a review of strategies and practices. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 144(3), 031010.
- Sorin, D., Dobra, R., & Teodor, V. (2021). Influence of cutting parameters on energy consumption during turning processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1188(1), 012028.
- Zhou, W., Li, X., & Wang, H. (2021). Energy-efficient machining: a review of recent technologies and future challenges. *Procedia CIRP*, 98, 251–256.